

Modélisation à base physique de la variabilité hydroclimatique à l'échelle d'un grand bassin versant tropical

FRANÇOIS LAURENT¹, DENIS RUELLAND²

¹Université du Maine – UMR Espaces Géographiques et Sociétés, Av. O. Messiaen, F-72085 Le Mans Cedex 9, France

²CNRS – UMR HydroSciences Montpellier, Pl. E. Bataillon, F-34395 Montpellier Cedex 5, France
francois.laurent@univ-lemans.fr

Résumé En Afrique de l'Ouest, l'espace soudanien est fortement affecté par une baisse des écoulements depuis les années 1970. La réduction des précipitations en est la principale cause. Mais, la sensibilité des bassins versants à cette baisse est variable et fait intervenir des processus complexes. La modélisation à base physique vise à mieux appréhender les interactions entre les facteurs externes (pluviométrie et température) et internes au bassin versant (couverts végétaux, sols et nappes souterraines). A cette fin, le modèle agro-hydrologique SWAT est mis en œuvre à un pas de temps journalier sur le bassin versant du Bani (100 000 km², Mali) sur la période 1952–2000. La modélisation implique une structuration préalable des données spatiales (pluviométrie, température, sols, couverts végétaux, topographie et discrétisation en sous-bassins) à une résolution spatiale et sémantique adaptée aux objectifs de la modélisation et à la disponibilité des données. Le modèle présente un certain réalisme physique dans la représentation des interactions sol-plante-atmosphère. Il s'appuie également sur des paramètres empiriques concernant le ruissellement, les nappes souterraines et l'écoulement en chenal. Ces paramètres sont calés afin d'optimiser le calcul du débit quotidien avec une validation sur différentes périodes et en différents points de mesure. Les résultats de calage et de validation sont satisfaisants à l'exutoire du bassin (indices de Nash de 0,88 en calage et de 0,81 à 0,91 en validation) mais également en différentes stations de mesure sur les affluents (indices de Nash de 0,70 à 0,85). Le modèle permet de mieux comprendre le rôle et la hiérarchie des facteurs de contrôle de l'écoulement sur ce vaste bassin tropical, il permet également de spatialiser les écoulements. Il peut ainsi constituer un appui pour évaluer les ressources en eau de surface dans ces espaces tropicaux vulnérables.

Mots clef Modélisation à base physique ; SWAT ; Variabilité hydroclimatique ; rivière Bani

Abstract West Africa is strongly affected by runoff decrease since the 1970s, which is mainly explained by a decline in rainfall. But, the catchments' sensitivity to this decrease is variable and brought in by complex processes. Physically-based modelling aims at representing the interactions between the external factors (rainfall and temperature) and internal factors in the catchment (landuse, soil and groundwater). To do so, the SWAT agro-hydrological model is operated at a daily time step over the period 1952–2000 in the Bani catchment (100 000 km², Mali). The modelling implies a preliminary constitution of spatial data (rainfall, temperature, landuse, soils and sub-basin delineation) in a resolution and an accuracy adapted to the simulation objectives and to the data availability. The model has a certain physical realism in the representation of the soil-vegetation-atmosphere interactions. It also leans on empirical parameters concerning runoff, groundwater and channel flow. The empirical parameters are calibrated to optimize the simulated daily discharge at the catchment's outlet. The validation is made over various periods and in various gauging stations. The calibration/validation results are satisfactory at the catchment's outlet (Nash coefficients values reaches 0.88 for calibration, and from 0.81 to 0.91 for validation) but also in various gauging stations located in tributaries (Nash coefficients values range from 0.70 to 0.85). The model could be use to better understand the role and the hierarchy of the control factors of flows over this large tropical catchment. It also allows to spatialize the water flow. It can so constitute a support to estimate the variability of surface water resources in these vulnerable tropical areas.

Key words Physically-based modelling; SWAT; Hydroclimatic variability; Bani River

INTRODUCTION

L'Afrique de l'Ouest est affectée depuis les années 1970 par une baisse de la pluviométrie (Bricquet *et al.*, 1997; L'Hôte *et al.*, 2002). Celle-ci a généré une diminution d'environ 30 à 60 % des écoulements des grands bassins versants (Servat *et al.*, 1998), la baisse se traduisant non seulement sur le module annuel, mais aussi sur les extrêmes (crues et étiages). Or, la réduction des ressources en eau constitue un des facteurs limitant du développement de la région. Ainsi, le delta intérieur du Niger connaît une crue de moindre ampleur ce qui dégrade les conditions de vie des pêcheurs, des agriculteurs et des éleveurs qui dépendent des inondations annuelles. Plus d'un million de personnes vivent en effet des ressources de ce delta et les équilibres sociaux sont menacés par la baisse de la crue (De Noray, 2003 ; Marie *et al.*, 2007). Le delta est alimenté par le fleuve Niger et par son affluent amont principal, le Bani.

De nombreuses questions se posent aujourd'hui dans cette région : quels sont les contributions

des différentes portions du bassin versant ? Quels sont les apports respectifs du ruissellement et des nappes souterraines et leur évolution dans le temps ? Quelles sont les interactions entre pluie – végétation – sol – topographie ? Comment intégrer la compréhension locale des mécanismes à l'échelle du bassin versant ?

La modélisation hydrologique semi-distribuée à base physique peut fournir des éléments de réponse à ces questions. Elle permet d'analyser les impacts de la variabilité des précipitations sur les stocks et les flux d'eau dans les différents compartiments du cycle de l'eau à l'échelle du bassin versant. Par ailleurs, elle prend en compte le poids et la variabilité spatiale d'autres facteurs tels que la végétation ou le sol.

Dans ce travail, nous évaluons la capacité du modèle SWAT à contribuer à la compréhension des écoulements sur le bassin versant du Bani. Ce bassin a été choisi d'une part pour les enjeux qu'il représente dans l'alimentation du delta intérieur du Niger, d'autre part pour les données qui y sont disponibles (notamment en matière de chroniques de débit de plusieurs de ses cours d'eau) et enfin parce que les écoulements n'y sont pas perturbés par des ouvrages hydrauliques de grande ampleur. Il constitue donc un espace d'analyse intéressant pour mieux comprendre les effets de la variabilité spatio-temporelle des pluies ainsi que des caractéristiques propres du bassin versant sur les écoulements.

MATERIELS ET METHODES

Zone d'étude

Le Bani draine un bassin d'environ 100 000 km² à la station de Douna. Il est situé principalement dans le sud-ouest du Mali mais est alimenté également par l'extrême ouest du Burkina Faso et le nord de la Côte d'Ivoire. Il se déverse dans le delta intérieur du Niger à hauteur de Mopti et contribue fortement à la formation de l'inondation annuelle du delta. Le module du cours d'eau est de 513 m³.s⁻¹ à Douna. Le régime du cours d'eau est de type tropical à saisons alternées : les hautes eaux s'étendent d'août à novembre, la moyenne mensuelle interannuelle la plus élevée se situe en septembre avec 1 941 m³.s⁻¹ à Douna, le cœur de l'étiage a lieu en mai avec 23 m³.s⁻¹ en moyenne mensuelle interannuelle à Douna (source : GRDC, mesures de 1922 à 1994). Olivry *et al.* (1993) et Mahé *et al.* (2000) ont mis en évidence une vidange plus précoce et plus rapide des nappes depuis 1970 en lien avec la baisse des précipitations.

Les précipitations moyennes annuelles sur la période d'étude de 1950 à 2000 présentent un gradient du sud au nord, avec environ 1 500 mm.an⁻¹ à la station d'Odienné en Côte d'Ivoire au sud à 730 mm.an⁻¹ à la station de San au nord. L'altitude s'échelonne de 580 m au sud à proximité d'Odienné jusqu'à 267 m à l'exutoire dans le delta intérieur du Niger. La topographie dominante est celle de plateaux avec des reliefs tabulaires armés de cuirasses ferrugineuses et de vallées faiblement encaissées tapissées de limons. L'amont du bassin versant est formé par un socle cristallin et métamorphique et présente des nappes souterraines de faible capacité de stockage car localisées dans les altérites ou générées dans la porosité de fissure. La partie aval est constituée de grès et de dépôts alluviaux de plus large ampleur le long du cours d'eau, les circulations souterraines y sont ainsi beaucoup plus conséquentes (Mahé *et al.* 1998 ; Ruelland *et al.*, 2009).

Modèle SWAT

SWAT est développé par l'USDA Agricultural Research Service (Arnold *et al.*, 1993 ; Arnold *et al.*, 1998). Il est conçu pour des bassins versants de quelques centaines à plusieurs milliers de km². Le modèle est semi-distribué : certains paramètres sont spatialisés tandis que d'autres sont globaux. Il est utilisé pour analyser les impacts du climat, du sol, de la végétation et des activités agricoles sur les écoulements. L'unité spatiale élémentaire est l'*Hydrologic Response Unit* (HRU) qui représente une combinaison spatiale de sol, de couvert végétal et de sous-bassin versant. Toute combinaison identique de ces trois éléments est supposée produire une réponse hydrologique similaire. Il fonctionne à un pas de temps journalier.

Certains processus sont représentés par des lois physiques telles que le transfert d'eau et le

stockage dans le sol, avec une approche basée sur le modèle EPIC. Cependant, SWAT n'est pas un modèle pleinement physique. Ainsi, les flux sortant du sol sont modélisés par la méthode du *Curve Number* pour le ruissellement et par une équation empirique basée sur le coefficient de tarissement pour l'écoulement souterrain (Arnold *et al.*, 1998).

L'accès aux variables et aux paramètres est facilité par un couplage du modèle avec un SIG. Les données météorologiques sont associées à une couche cartographique de stations météorologiques. A chaque sous-bassin est associée une station météorologique selon la méthode du plus proche voisin. Les couches cartographiques de sol et de couvert végétal sont liées à des bases de données dont les paramètres sont adaptés à la zone d'étude (par exemple : la réserve utile du sol, la perméabilité des horizons pédologiques, leur épaisseur ou la densité du couvert foliaire, la profondeur d'enracinement, etc.). Les activités agricoles et pastorales peuvent également être introduites pour chaque HRU afin de tenir compte de leurs conséquences sur le cycle de l'eau. Le réseau hydrographique est paramétré notamment en matière de rugosité et de perméabilité des berges ou de géométrie du chenal. Le modèle permet de suivre les flux et les stocks entre les différentes étapes du cycle de l'eau avec un affichage des résultats sous forme de tables ou de cartes (Tripathi *et al.*, 2003). La lecture des résultats permet de caler et de valider le modèle non seulement sur des indices d'efficacité statistique tels que l'indice de Nash (Nash & Sutcliffe, 1970) mais aussi d'évaluer le réalisme des simulations à partir d'autres sorties telles que le bilan hydrique du sol, le coefficient de ruissellement ou la production de biomasse (Laurent *et al.*, 2007). Le modèle a été validé dans de multiples régions du monde, dans différents contextes climatiques et géologiques et pour des bassins versants de taille variable (Srinivasan *et al.*, 1998 ; Santhi *et al.*, 2001 ; Vaché *et al.*, 2002). Il a été notamment appliqué dans la zone d'étude sur l'ensemble des bassins versants du Niger, de la Volta et du Sénégal (Schuol & Abbaspour, 2006).

Données

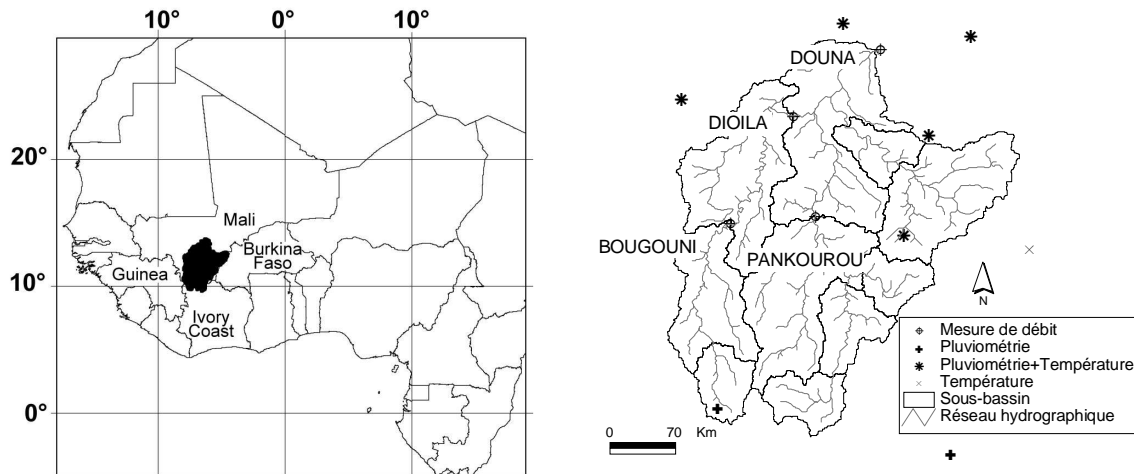
Les HRU, constituant les unités spatiales du modèle SWAT, nécessitent d'intégrer un modèle numérique de terrain, une carte des sols et une carte d'occupation du sol. A ces données spatialisées sont associées des tables de paramètres renseignant chaque unité spatiale sur ses propriétés. La localisation des stations météorologiques est également nécessaire, y sont associées les tables contenant les chroniques de pluie et de température. La qualité des simulations est fortement conditionnée par la qualité des données entrées à la fois en matière de résolution spatiale et de précision sémantique (Romanowicz *et al.*, 2005).

Météorologie

SWAT fonctionne à un pas de temps quotidien, il nécessite les précipitations, les températures minimales et les températures maximales journalières. Sur une aussi longue période et sur une si grande surface, les postes météorologiques présentent des lacunes de mesure et l'interpolation par la méthode de polygones de Thiessen, implantée dans SWAT, nous est apparue trop simplificatrice car la modélisation semi-distribuée est fortement sensible à la représentation spatiale de cette entrée (Ruelland *et al.*, 2008). Ainsi, pour les pluies, nous avons intégré non pas les stations réelles mais une grille de stations virtuelles issues d'une interpolation inverse pondérée par la distance au carré. 65 stations ont été mobilisées pour ce traitement. SWAT attribue une station de référence à chaque sous-bassin versant par la méthode du plus proche voisin entre le centroïde du sous-bassin versant et la station météorologique. L'évapotranspiration potentielle est calculée selon la méthode d'Hargreaves avec SWAT (Hargreaves & Samani, 1985) à partir de chroniques de températures issues de 9 stations.

(a)

(b)



Sols

Les sols sont spatialisés à partir de la carte des sols au 1:5 000 000 de la FAO (Fig. 2a). Une telle résolution réduit considérablement la variabilité spatiale de ce facteur déterminant mais aucune autre carte n'est disponible sur l'ensemble de l'étendue du bassin versant. Les unités de sol sont représentées par une structure et une texture type issues d'observations de terrain. Les paramètres hydrologiques de chaque horizon de sol sont déduits de leur texture (Bastet *et al.*, 1998 ; Laurent & Rossignol, 2004) : réserve utile, densité volumique et perméabilité. Ces éléments sont intégrés dans la table associée à la carte des sols. Les principaux sols qui sont représentés sur cette carte s'organisent ainsi du sud vers le nord :

- Acrisols Ferriques : sols argileux avec une faible saturation en bases échangeables, très acides et évolués, généralement présents dans des topographies faiblement ondulées, liés à un climat tropical humide ;
- Luvisols ferriques : sols riches en oxydes de fer et d'aluminium, avec un horizon de surface grossier surmontant un horizon fin, riches en bases échangeables ; généralement présents dans les plaines et plateaux faiblement ondulés ;
- Gleysols : sols présentant un horizon hydromorphe à moins de 50 cm de la surface, fréquemment de texture fine ; ces sols apparaissent dans les fonds de la vallée du Bani à l'aval du bassin ;
- Cambisols eutriques ou ferraliques : sols épais de texture limono-sableuse.

Topographie

Le relief est issu du SRTM30 (Shuttle Radar Topography Mission d'une résolution de 30 secondes d'arc, une seconde d'arc équivalent à 1/3600 de degré, soit 93m à l'équateur). Il est corrigé dans SWAT afin d'éliminer les cuvettes et de construire les chenaux d'écoulement ainsi que les sous-bassins versants. Les sous-bassins ont été choisis à l'amont de différentes stations de mesure des débits. A chaque sous-bassin sont associés des valeurs topographiques tels que le plus long chemin hydraulique ou la pente moyenne.

Occupation du sol – couverts végétaux

L'occupation du sol a été constituée à partir de la carte GLCF (*Global Land Cover Facility*) fournie par l'université du Maryland et établie à partir d'images NOAA-AVHRR acquises entre 1981 et 1994 (Hansen *et al.*, 1998) (Fig. 2b). La résolution spatiale est de 1 km. Les unités initiales ont été reclassées afin de constituer les unités suivantes : forêts (2,1% de la surface du bassin), savanes arbustives fermées (75,8%), savanes arbustives ouvertes (2,1%), steppes (16,0%), cultures (3,7%), eau et zones urbaines.

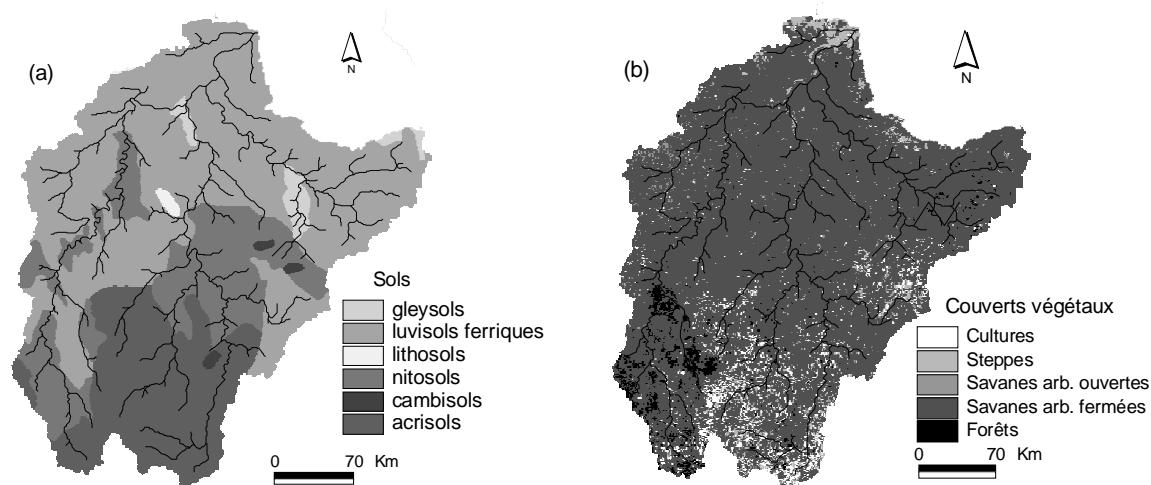


Fig. 2 Entrées spatialisées de SWAT sur le Bani : (a) Sols (source : FAO) ; (b) Couverts végétaux (source : GLCF).

Mesures de débits

En fonction de la quantité et de la qualité des séries chronologiques disponibles, quatre stations de débits (Douna, Dioïla, Bougouni et Pankourou) ont été retenues pour le calage et la validation du modèle (Fig. 1). Ces données proviennent des réseaux de mesures des Directions Nationales de l'Hydraulique du Mali et de Côte d'Ivoire.

Calage et validation

Le calage du modèle est effectué sur 14 paramètres de nature empirique concernant notamment la capacité des végétaux à extraire l'eau du sol, la dynamique de la nappe souterraine, la rugosité des chenaux et le processus de ruissellement (Tableau 1). Le *Curve Number* de chaque couvert végétal a été également adapté. Les simulations s'étendent de 1950 à 2000. Les deux premières années (1950-1951) sont utilisées pour l'initialisation du modèle. Le calage a été réalisé en référence à la station de Douna sur la période plus sèche des années 1972 à 1992 (moyenne des précipitations à Kankela : 885 mm/an). La validation concerne deux périodes : l'une plus humide de 1952 à 1971 (moyenne à Kankela : 1075 mm/an), l'autre également sèche de 1993 à 2000 (moyenne à Kankela : 901 mm/an). Les critères utilisés pour le calage sont : le coefficient de Nash et le cumul d'écoulement.

Tableau 1 Valeurs des paramètres calés dans SWAT.

Paramètre	Définition	Valeur de calage
ALPHA_BF	Coefficient de tarissement de la nappe souterraine	0,45
GW_DELAY	Délai de recharge de l'aquifère (j)	3
GW_REVAP	Coefficient d'évaporation à partir de la nappe souterraine	0,1
REVAPMN	Seuil d'évaporation à partir de la nappe souterraine (mm)	50
RCHRG_DP	Coefficient de percolation vers la nappe profonde	0,01
GWQMN	Seuil de contribution de la nappe souterraine à l'écoulement en chenal, écoulement de base (mm)	1
SURLAG	Coefficient de délai du ruissellement	2
ESCO	Facteur sol d'évaporation du sol en fonction de la profondeur	0,84
EPCO	Facteur végétal d'évaporation du sol en fonction de la profondeur	0,80
CH_K1	Perméabilité des berges des chenaux secondaires (mm.h ⁻¹)	7
CH_N1	Coefficient de Manning des chenaux secondaires	0,13
CH_K2	Perméabilité des berges des chenaux principaux (mm.h ⁻¹)	7
CH_N1	Coefficient de Manning des chenaux principaux	0,13
ALPHA_BNK	Coefficient de tarissement dans les berges des cours d'eau	0,3

RESULTATS

Validation spatio-temporelle

Le calage du modèle à Douna de 1972 à 1992 aboutit à un coefficient de Nash de 0,88 indiquant une bonne aptitude du modèle à reproduire les écoulements observés à la station de référence de Douna. La validation sur la période 1952-1971, nettement plus humide, est également satisfaisante à cette station (Nash de 0,81) : la dynamique temporelle est respectée mais le pic de crue est sous-estimé (Fig. 3). La validation sur l'autre période sèche des années 1992-2000 produit un coefficient de Nash de 0,91 encore plus élevé que sur la période de calage.

Le modèle calé à Douna donne des résultats globalement satisfaisants sur les sous-bassins amont mesurés (Tableau 2) que ce soit au sud, en zone soudano-guinéenne, ou dans la partie médiane, en zone soudanienne. La production de biomasse simulée par le modèle est proche des moyennes observées dans la zone (Marie *et al.*, 2007) et (<http://greforec.cirad.fr>), ainsi les valeurs (en $\text{tMS}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$) varient selon les années de 1,5 à 1,7 pour les cultures, de 2,7 à 3,2 pour les steppes, de 3,5 à 4,5 pour les savanes arbustives, et de 3,5 à 3,8 pour les forêts.

Tableau 2 Indices de Nash pour les périodes de calage et de validation à la station de calage (Douna) et en d'autres stations.

	1972-1992 (période de calage)	1952-1971 (période de validation 1)	1993-2000 (période de validation 2)
Douna	0,88	0,81	0,91
Dioïla	0,71	0,79	0,70
Bougouni	0,79	0,74	0,77
Pankourou	0,84	0,75	0,85

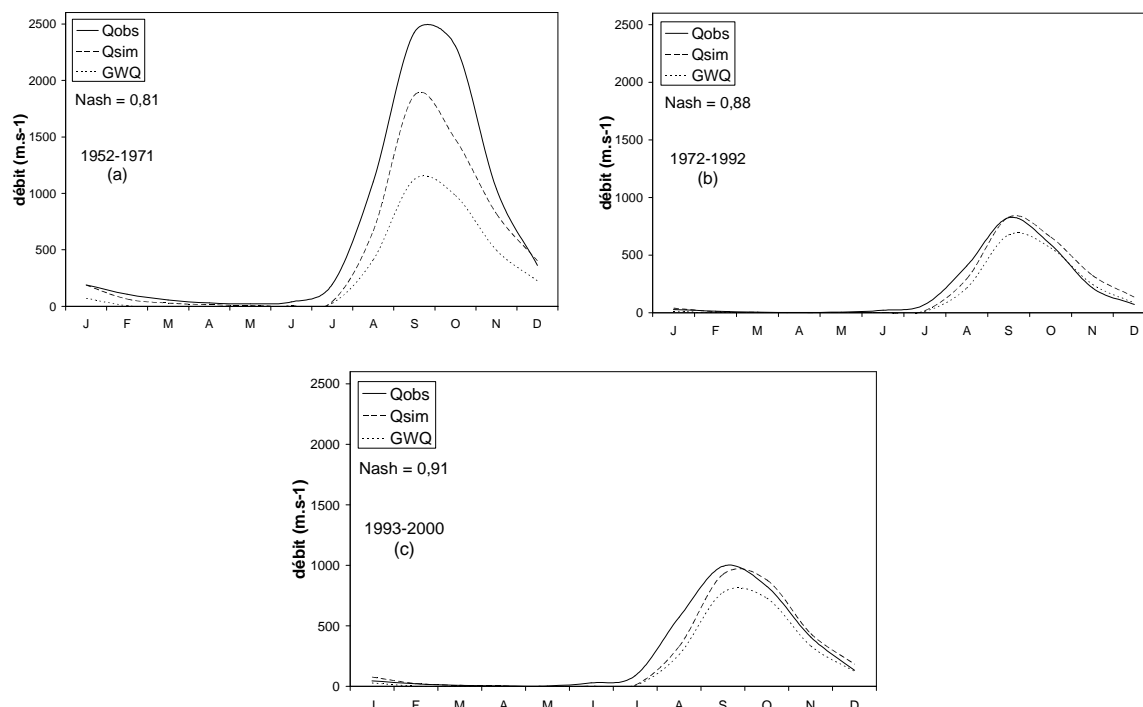


Fig. 3 Moyennes mensuelles des débits mesurés Q_{obs} et simulés Q_{sim} , et des débits de base simulés GWQ (générés par les nappes souterraines) à Douna : (a) 1952-1971; (b) 1972-1992 ; (c) 1993-2000.

Sur la période 1952-2000, le taux de contribution du ruissellement à l'écoulement dans les cours d'eau s'établit à 37 %, soit 5 % des précipitations sur l'ensemble du bassin versant. Ces valeurs s'inscrivent dans le domaine des valeurs mesurées en parcelles expérimentales par Roose (1983) dans les années 1955-1975, puisqu'il relevait en milieu de savane arbustive, sur des luvisols et des

acrisols ferriques sur granite, des coefficients de ruissellement représentant 0,2 à 3 % des précipitations annuelles sous couvert naturel et de 2 à 45 % sous des cultures.

Interprétation

Le fait que SWAT soit fondé sur une approche à base physique à l'échelle de HRU permet d'évaluer spatialement les dynamiques de l'eau en fonction des caractéristiques des sols et des couverts végétaux. Le coefficient de ruissellement correspond au rapport entre le ruissellement et l'écoulement au sein de chaque HRU. Les portions de bassin représentées dans les tableaux 3 à 6 sont celle de Pankourou au sud (967 mm.an⁻¹ en moyenne) et celle à l'amont immédiat de Douna (800 mm.an⁻¹ en moyenne).

Tableau 3 Lame d'eau écoulée (mm.an⁻¹) sur le sous bassin de Pankourou, moyenne 1952-2000.

	Cultures (sorgho)	Steppes	Savanes arbustives ouvertes	Savanes arbustives fermées	Forêts
Luvisol ferrique / Nitosol	223	196	163	134	97
Cambisol	217	-	33	20	-
Acrisol	253	232	196	169	116

Tableau 4 Lame d'eau écoulée (mm.an⁻¹) sur le sous bassin de Douna, moyenne 1952-2000.

	Cultures (sorgho)	Steppes	Savanes arbustives ouvertes	Savanes arbustives fermées	Forêts
Luvisol ferrique / Nitosol	142	128	79	49	21
Cambisol	-	76	3	2	-
Gleysol	134	113	74	46	-
Lithosol	-	280	280	280	-

Tableau 5 Coefficient de ruissellement sur le sous bassin de Pankourou, moyenne 1952-2000.

	Cultures (sorgho)	Steppes	Savanes arbustives ouvertes	Savanes arbustives fermées	Forêts
Luvisol ferrique /Nitosol	0,63	0,53	0,55	0,46	0,40
Cambisol	0,50	-	0,30	0,15	-
Acrisol	0,57	0,50	0,50	0,47	0,40

Tableau 6 Coefficient de ruissellement sur le sous bassin de Douna, moyenne 1952-2000.

	Cultures (sorgho)	Steppes	Savanes arbustives ouvertes	Savanes arbustives fermées	Forêts
Luvisol ferrique / Nitosol	0,67	0,55	0,57	0,43	0,36
Cambisol	-	0,38	0,49	0,23	-
Gleysol	0,96	0,93	0,95	0,92	-
Lithosol	-	0,01	0,03	0,01	-

Variabilité selon les sols

Les tableaux 3 à 6 montrent de nettes différences d'écoulement entre les types de sols présents sur les sous-bassins. Les lithosols produisent des écoulements importants du fait de leur faible réserve utile. Les cambisols présentent, au contraire, une forte réserve utile (160 mm) favorable au stockage de l'eau dans la zone racinaire et donc à son évapotranspiration tandis que les luvisols ferriques, les nitosols et les gleysols produisent des écoulements moindres, principalement du fait de leur réserve utile intermédiaire (80 à 100 mm).

Le coefficient de ruissellement est réduit dans les lithosols en lien avec leur perméabilité et leur faible teneur en argiles. A l'opposé, il est très élevé sur les gleysols quasiment imperméables en profondeur. Les luvisols ferriques et les nitosols présentent des coefficients relativement élevés du fait de leur teneur importante en argile et leur perméabilité intermédiaire. La texture limono-sableuse des cambisols permet une infiltration plus importante ce qui réduit le ruissellement.

Variabilité selon les couverts végétaux

L'écoulement varie également fortement selon les couverts végétaux : il est inversement proportionnel à la densité du couvert végétal (Tableaux 3 et 4). Les cultures laissant le sol nu ou peu couvert une grande partie de l'année réduisent l'évapotranspiration tandis que des couverts végétaux naturels exploitent plus largement le potentiel de rétention en eau du sol, l'écoulement est ainsi largement supérieur dans les espaces cultivés.

Le coefficient de ruissellement varie fortement selon les couverts (Tableaux 5 et 6) : moyen sous forêt, il augmente légèrement sous savane arbustive fermée et plus fortement sous savane arbustive ouverte et dans les steppes pour atteindre son maximum sous les cultures. Ces résultats traduisent la prise en compte de la densité du couvert végétal du sol dans le calcul du ruissellement. Les travaux de Roose (1983) en parcelles expérimentales montraient une différence de ruissellement encore beaucoup plus nette entre couverts naturels et cultures.

Variabilité entre portions de bassin versant

La distribution inégale des pluies comme la variabilité spatiale des sols et des couverts végétaux génèrent des différences sensibles en ce qui concerne l'écoulement entre les portions de bassin versant. Selon toute logique, la lame écoulée décroît du sud vers le nord en fonction du gradient de précipitations (Fig. 4). La contribution relative du ruissellement à l'écoulement dans les cours d'eau varie également selon les portions de bassin (Fig. 5) : à pluviométrie comparable, les bassins produisent des ruissellements différents du fait de la distribution des sols et de la végétation.

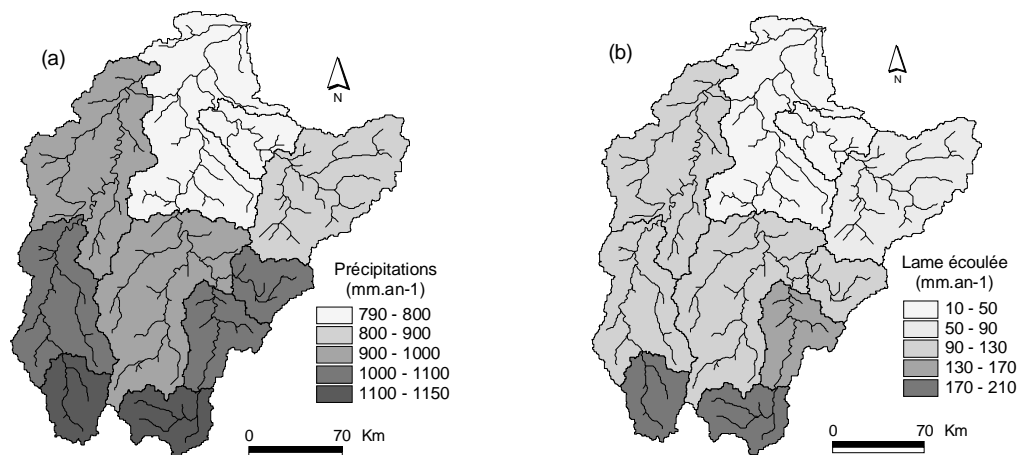


Fig. 4 (a) Précipitations et (b) lame écoulée simulée – moyennes de 1952 à 2000 (en mm.an⁻¹).

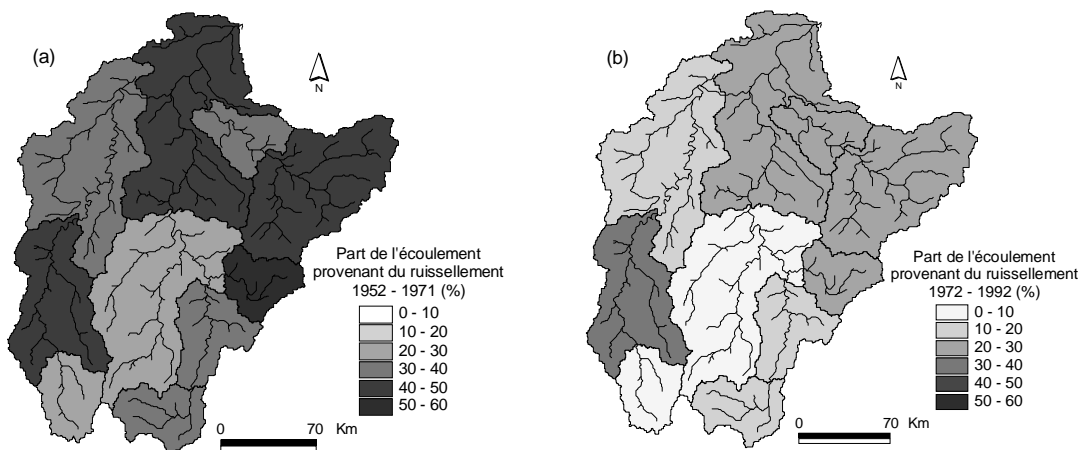


Fig. 5 Estimation de la part de l'écoulement provenant du ruissellement : (a) moyenne 1952-1971; (b) moyenne 1972 -1992.

Variabilité temporelle de la contribution de ruissellement à l'écoulement

Les simulations présentent un taux d'écoulement provenant du ruissellement plus élevé en période humide qu'en période sèche : 38 % en moyenne de 1952 à 1971 contre 20 % de 1972 à 1992 ou 27 % de 1993 à 2000. Le coefficient de corrélation entre les précipitations annuelles et le ratio annuel d'écoulement provenant du ruissellement s'établit à 0,77 sur l'ensemble de la période 1952-2000. Ces résultats montrent assez logiquement que le ruissellement généré par le modèle est plus sensible à la baisse de la pluviométrie que l'écoulement de base et qu'en année sèche les nappes souterraines contribuent relativement plus à l'écoulement des cours d'eau qu'en année humide, même si l'écoulement de base diminue en valeur absolue. Ce phénomène s'observe également sur les hydrogrammes interannuels simulés moyens (Fig. 3).

DISCUSSION ET CONCLUSION

Les travaux réalisés montrent l'intérêt du modèle semi-distribué SWAT à représenter les processus sur un grand bassin versant d'Afrique de l'Ouest en zone soudano-sahélienne. Schuol & Abbaspour (2006) ont appliqué le modèle SWAT sur l'ensemble des bassins de la Volta, du Niger et du Sénégal avec une méthode de calage spécifique et ont obtenu des résultats très variables mais globalement faibles quant au coefficient de Nash. Nous montrons ici sur le Bani que le modèle SWAT reproduit correctement les débits sur une longue période (1952-2000). Il présente une bonne robustesse aux variations climatiques et une transposition spatiale satisfaisante en différentes stations de mesure sur des portions à l'amont du bassin versant.

Il produit de plus des éléments de compréhension des processus en jeu. L'écoulement varie fortement en fonction des précipitations mais aussi, dans une moindre mesure, en fonction des sols et de la végétation. Selon le modèle, ces facteurs déterminent également la contribution spécifique des nappes souterraines et du ruissellement dans le temps et dans l'espace. Ainsi, la contribution du ruissellement à l'écoulement du cours d'eau varie fortement selon les sous bassins. D'un point de vue temporel, la contribution du ruissellement semble diminuer lors des périodes sèches alors que les nappes souterraines assureraient la majeure partie de l'écoulement annuel même si les flux qui en proviennent se réduisent en valeur absolue. Avec le modèle conceptuel HydroStrahler, Ruelland *et al.* (2009) ont évalué par simulation une baisse drastique de l'écoulement de base à partir de 1970, à la fois en valeur absolue, ce qui converge avec nos résultats, mais aussi en valeur relative dans la formation du débit des cours d'eau. Cette divergence peut s'expliquer par les différentes approches de modélisation car l'écoulement de base calculé par les modèles intègre en réalité différents flux : ceux de subsurface, ceux d'écoulements de nappes profondes, ceux du milieu fissuré et ceux du milieu poreux.

SWAT constitue à cette échelle un outil intéressant pour étudier l'effet spatial et temporel de la variabilité du climat. Néanmoins, le réalisme des résultats doit être encore considéré avec prudence car la validation des simulations par HRU ne peut être réalisée faute de mesures suffisantes. Par ailleurs, la carte des sols reste trop grossière pour représenter toute la complexité des impacts du sol sur les écoulements. Enfin, la carte des couverts végétaux identifie les unités présentes durant les années 1980 ; nous envisageons d'intégrer l'évolution des couverts végétaux mise en évidence récemment par télédétection sur le secteur (Ruelland *et al.* 2010 ; *in press*) afin d'évaluer l'impact de la déforestation et de l'expansion des zones cultivées des 50 dernières années sur l'hydrologie de surface.

Remerciements Les travaux de recherche s'intègrent dans le projet RESSAC, financé par l'ANR, dans le cadre du programme « Vulnérabilité : milieu et climat ».

REFERENCES

- Arnold, J. G., Allen, P. M. & Bernhardt, G. (1993) A comprehensive surface-groundwater flow model. *J. Hydrol.* **142**, 47–69.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Mutiah, R. S. & Williams, J. R. (1998) Large area hydrologic modeling and assessment, Part 1: Model Development. *JAWRA* **34**(1), 73–90.
- Bastet, G., Bruand, A., Quetin, P. & Cousin, I. (1998) Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à l'aide de fonctions de pédotransfert (FPT) : une analyse bibliographique. *Etude et Gestion des Sols* **5**(1), 1–24.

- Bricquet, J.-P., Bamba, F., Mahé, G., Toure, M. & Olivry, J.-C. (1997) Évolution récente des ressources en eau de l'Afrique atlantique. *Rev. Sci. Eau* **10**(3), 321–337.
- De Noray, M. L. (2003) Delta intérieur du fleuve Niger au Mali – quand la crue fait la loi : l'organisation humaine et le partage des ressources dans une zone inondable à fort contraste. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement* **4**(3): URL : <http://vertigo.revues.org/index3796.html>.
- Hansen, M., DeFries, R., Townshend, J. R. & Sohlberg, R. (1998) UMD Global Land Cover Classification, 1 km, version 1.0, Product Coverage Date: 1981-1994. College Park, Maryland, USA, Department of Geography, University of Maryland.
- Hargreaves, G. H. & Samani, Z. A. (1985) Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture* **1**, 96–99.
- L'Hôte, Y., Mahé, G., Somé, B. & Triboulet, J.-P. (2002) Analysis of a Sahelian index from 1896 to 2000: the drought continues. *Hydrol. Sci. J.* **47**(4), 563–572.
- Laurent, F. & Rossignol, J.-P. (2004) Sensibilité d'un modèle agro-hydrologique à la cartographie des sols : test d'une méthode basée sur l'indice topographique et la lithologie. *Etude et Gestion des Sols* **11**(3), 199–217.
- Laurent, F., Ruelland, D. & Chapdelaine, M. (2007) Simulation de l'effet de changements de pratiques agricoles sur la qualité des eaux avec le modèle SWAT. *Revue des Sciences de l'Eau* **20**(4): 395–408.
- Mahé, G., Dessouassi, R., Cissoko, B. & Olivry, J.-C. (1998) Comparaison des fluctuations interannuelles de piézométrie, précipitation et débit sur le bassin versant du Bani à Douana au Mali. *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century, Abidjan'98 Conference*, IAHS.
- Mahé, G., Olivry, J.-C., Dessouassi, R., Orange, D., Bamba, F. & Servat, E. (2000) Relations eaux de surface – eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali. *C. R. Acad. Sci.* **330**, 689–692.
- Marie, J., Morand, P. & N'Djim, H. (2007) Avenir du fleuve Niger. Paris, IRD ed.
- Nash, J. E. & Sutcliffe, J. V. (1970) River flow forecasting through conceptual models, a discussion of principles. *J. Hydrol.* **10**, 282–290.
- Olivry, J.-C., Bricquet, J.-P. & Mahé, G. (1993) Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide ?, in : Gladwell J.S. (éd.), *Hydrology of warm humid regions*, Proceedings of the AISH Symposium, Yokohama, Japan, IAHS no 216, pp. 67-78.
- Romanowicz, A. A., Vanclooster, M., Rounsevell, M. & Junesse, I. A. (2005) Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrisation: a case study in the Thyle catchment, Belgium. *Ecological Modelling* **187**(1): 27–39.
- Roose, E. (1983). Ruissellement et érosion avant et après défrichement en fonction du type de culture en Afrique occidentale. *Cahiers ORSTOM - série Pédologie*, 20(4), 327-339.
- Ruelland, D., Ardoin-Bardin, S., Billen, G. & Servat, E. (2008) Sensitivity of a lumped and semi-distributed hydrological model to several methods of rainfall interpolation over a large basin in West Africa. *J. Hydrol.* **361**, 96–117.
- Ruelland, D., Guinot, V., Levvasseur, F. & Cappelaere, B. (2009) Modelling the long-term impact of climate change on rainfall-runoff processes over a large Sudano-Sahelian catchment. Proc. of *Symposium HS.2 at the Joint IAHS & IAH Convention "New Approaches to Hydrological Prediction in Data Sparse Regions"*, Hyderabad, India, 6-12 September 2009, *IAHS Publ.*, **333**, 59–68.
- Ruelland, D., Levvasseur, F. & Tribotté, A. (2010) Patterns and dynamics of land-cover changes since the 1960s over three experimental areas in Mali. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* **12**(1), 11–17.
- Ruelland, D., Tribotté, A., Puech, C. & Dieulin, C. Comparison of methods for LUCC monitoring over 50 years from aerial photographs and satellite images in a Sahelian catchment. *Int. J. Remote Sens.* (in press).
- Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Dugas, W. A., Srinivasan, R. & Hauck, L. M. (2001) Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *JAWRA* **37**(5), 1169–1189.
- Schuol, J. & Abbaspour, K. C. (2006) Calibration and uncertainty issues of a hydrological model (SWAT) applied to West Africa. *Adv. Geosci.* **9**, 137-143.
- Servat, E., Paturol, J.-E., Kouame, B., Travaglio, M., Ouedraogo, M. Boyer, J.-F., Lubes-Niel, H., Fristch, J.-M., Masson, J.-M. & Marieu, B. (1998) Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. Proc. of *Abidjan'98 Conference "Water Ressources Variability in Africa during the XXth Century"*, *IAHS Publ.* **252**, 323–337.
- Srinivasan, R., Ramanarayanan, T. S., Arnold, J. G. & Bednarz, S. T. (1998) Large area hydrologic modeling and assessment, Part 2: Model Application. *JAWRA* **34**(1), 91–101.
- Tripathi, M. P., Panda, R. K. & Raghuvanshi, N. S. (2003) Identification and prioritisation of critical sub-watersheds for soil conservation management using the SWAT model. *Biosystems Engineering* **85**(3): 365–379.
- Vaché, K., Eilers, J. & Santelmann, M. (2002) Water Quality Modeling of Alternative Agricultural Scenarios in the US Corn Belt. *JAWRA* **38**(3), 773–787.